

叶益信, 邓居智, 李 曼, 等. 电磁法在深部找矿中的应用现状及展望. . 地球物理学进展, 2011, 26(1): 327~334, DOI: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 01. 039.

Ye Y X, Deng J Z, Li M, *et al.* Application status and vistas of electromagnetic methods to deep ore prospecting. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2011, 26(1): 327~334, DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 01. 039.

电磁法在深部找矿中的应用现状及展望

叶益信, 邓居智*, 李 曼, 杨海燕
(东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 抚州 344000)

摘 要 地球物理勘探方法(尤其是电磁法)在发现金属矿产资源中取得了很大的成功. 一般认为离地表 500 米以内的金属矿床已基本上被发现和勘探利用, 并且正在迅速枯竭. 由于在新的采矿区安装新的采矿设施非常昂贵, 因此当前面临的挑战是在老矿区内及其周围寻找适合开采的深部矿体(0. 5km~2km). 寻找深部矿体需要大尺度的地球物理方法支撑, 本文用有限篇幅介绍了电磁法在深部找矿中的应用现状、电磁法数据处理和解释研究进展及仪器设备研制进展, 以典型案例说明了它们在深部找矿中的应用效果, 对电磁法技术在深部找矿中的应用前景作出了展望.

关键词 电磁法, 深部矿, 勘查, 展望

DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 01. 039 中图分类号 P631 文献标识码 A

Application status and vistas of electromagnetic methods to deep ore prospecting

YE Yi-xin, DENG Ju-zhi*, LI Man, YANG Hai-yan
(Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology Fundamental Science for National Defense, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China)

Abstract Geophysical methods (particularly electromagnetic methods) have been very successfully used to discover economic base metal and precious metal ore resources. A common view is that all mineral deposits within 500 m of the surface, and close to existing infrastructure, have essentially been discovered and exploited, and are rapidly being depleted. Because of the high cost of installing new infrastructure in green field areas, the modern challenge is to determine if there are deeper deposits at economically recoverable depths (typically 0. 5 to 2 km) within or close to existing deposits and infrastructure. Discovering deep ore needs large scale geophysical methods' supporting. Application status of electromagnetic methods (EM) to deep ore prospecting, study progress of EM data process and interpretations and EM instruments are introduced in the paper. Some examples are given to show application efficiency of EM techniques to deep ore prospecting. Some promising aspects of the applications of EM techniques to deep ore prospecting are presented.

Keywords electromagnetic method, deep ore, prospecting, vistas

0 引 言

矿产资源是自然资源的一个重要组成部分, 是人类赖以生存的物质基础, 是国家安全与经济发展的重要保证. 据估计我国 95% 以上的能源和 80% 以上的工业原材料均取自矿业, 矿业支撑了占我国

收稿日期 2010-08-15; 修回日期 2010-11-20.

基金项目 中国地质调查局地质大调查项目(2009-01-14-01)和国家重大科技专项(SinoProbe-03-04)资助.

作者简介 叶益信, 1983 年生, 男, 江西上饶人, 助教, 2009 年在中国地质大学(武汉)获地球探测与信息技术专业硕士学位, 从事电磁法理论和应用等教学与科研工作. (E-mail: yixinye321@126. com)

* 通讯作者 邓居智, 1972 年生, 男, 江西人, 博士, 教授, 从事电磁法理论和应用等教学与科研工作. (E-mail: jzhdeng73@gmail. com)

GDP70%的国民经济的运转^[1]. 随着国民经济的快速发展,对各种矿产资源的需求量越来越大,经过近半个世纪的开采,我国大部分老矿区面临着浅部矿产资源日渐枯竭,接替资源严重不足的问题,寻找深部隐伏矿体已成为当前地质找矿的重点也是难点之一^[2].

世界电磁法的发展已有一个多世纪的历史,我国解放前在个别金属矿中就进行过电法勘探,近 20 年来,为适应国民经济的发展,电磁法技术取得了前所未有的高速发展,据不完全统计有 20 多种^[3],在金属找矿方面,除了传统的电法外,电磁法是最主要的方法. 而且由于电磁法具有勘探深度大不受高阻层屏蔽等的优点,已成为深部找矿中的常用地球物理方法.

近年来,国内外电磁法在寻找深部隐伏矿中的应用取得了很多有用的成果,如加拿大萨德伯里(Sudbury)盆地镍-铜矿集区^[4,5]、加拿大 Shea 河铀矿床^[6]、美国内华达州金矿床^[7]、美国亚利桑那州深部硫化物矿床^[8,9]、墨西哥圣尼古拉(San Nicolás)硫化物矿床^[10]、俄罗斯 Malaya Botuobiya 及 Zimnii Bereg 金伯利岩矿床^[11]、澳大利亚奥林匹克坝(Olympic dam)铜-铀-金矿床^[12]、铜陵龙虎山矿集区^[13]、内蒙古钼矿床^[14]、辽西康杖子区^[15]、东天山卡拉塔格(红山)铜金矿化带梅岭矿床^[16]、新疆萨吾尔金矿带阔尔真阔腊金矿床^[17]、赤峰柴胡栏子金矿床^[18]等著名成矿区和矿床深部矿体的发现,这表明电磁法在寻找深部隐伏矿方面具有巨大的潜力.

1 电磁法深部找矿应用现状

对于金属矿产的勘查,除了利用传统的电法之外,电磁法仍然是主要的方法. 近年来激电法(SIP/CR)、人工源和天然源的混合场源法(EH4)、人工源声频大地电磁法(CSAMT)、瞬变电磁(TEM)、大地电磁法(MT)等已逐步应用于金属矿勘查中,并在寻找深部隐伏矿床、构造复杂区的矿床等方面都取得了有用的成果.

MT 是频率域电磁法的典型方法,是通过改变频率达到测深目的的天然源电磁法,所以 MT 在寻找深部隐伏矿中有不可替代的优势. MT 发展开始于上世纪五十年代初期,大约经过 10 年,MT 在理论和技术上取得了许多突破性进展后,进入了实用阶段^[19]. MT 的勘探深度不仅与频率有关,还与地表电导率及其厚度有关,所以在发展初期,在美国、加拿大等低阻覆盖层较薄的国家应用较广,在随后

的几十年里,在世界其他国家也得到了应用推广,现在 MT 勘探已在石油公司寻找油气时得到普遍认可,在深部地热资源研究中也发挥着重要作用^[20]. MT 的勘探深度可以达到几十公里乃至上百公里,且使用起来方便便宜,在深部找矿中的应用成果显著,如 MT 在加拿大萨德伯里镍-铜矿床^[5]和俄罗斯 Malaya Botuobiya 及 Zimnii Bereg 金伯利岩矿床^[11]的应用均取得了很好的效果.

MT 虽然在寻找深部隐伏矿中有不可替代的优势,但是它的信号很弱且抗干扰能力较差,所以 MT 经过几十年的发展,为了适应不同的观测环境,MT 发展了很多变种方法且在找矿中得到了应用,如以提高信噪比的可控源音频大地电磁法(CSAMT)和以提高分辨率的混合源电磁法(EH-4),CSAMT 的频率范围一般为 $n \sim 8192$ Hz,勘探深度大于 2 km, EH-4 的频率范围一般为 10~100 kHz,在 1 km 以内有较高的分辨率. 目前这些方法在我国深部找矿中已进入推广应用阶段,如采用 CSAMT 法在辽西康杖子区深部发现了 500~800 m 深的钼铁矿^[15],采用 EH-4 法在东天山卡拉塔格(红山)铜金矿化带梅岭矿床发现了埋深达 700m 的铜矿^[16]. 上述方法也可以综合使用,以提高深部找矿成效^[18].

TEM 是时间域电磁法的典型方法,TEM 直到上世纪七十年代,在澳大利亚得到了发展和应用,TEM 与传统的直流电法、激电方法相比,其探测深度明显要大,垂向分辨率也高,易于探测到覆盖层下的良导体,探测深度可达 300~400 m. 近年来,随着仪器设备的不断改进,探测深度可达 1500 m^[21]. 上世纪 80 年代以来,利用该方法相继发现了一批隐伏的、埋藏较深的金属矿床,如 1991 年澳大利亚发现的欧内斯特亨利(Emest Herry)黄铁矿型铜矿,埋深近百米^[22]. 在应用过程中,TEM 发展了瞬变电磁剖面法、瞬变电磁测深法、航空瞬变电磁(AEM)、井中瞬变电磁(DHEM)等四类方法. 目前 TEM 在我国已进入普及阶段^[23].

激发极化(IP)现象在上世纪 20 年代由法国科学家提出,直到上世纪 40 年代末期在美国和俄罗斯的勘探中得到利用. IP 法是探测有色矿产资源的经典方法,它对于寻找浸染状矿和斑岩型矿有较好效果,因为这类矿物颗粒分散在岩体之中,互不相连,不能形成低阻异常,却可以产生较大的激电异常. 然而较广分布的黄铁矿、石墨化和碳化岩体,往往产生更强烈的激电异常,很难与矿体异常分开,此外人文电磁噪声也会造成强烈干扰^[21]. 传统的 IP 法分为

时间域和频率域 IP 法,探测深度取决于测区平均电阻率和人文噪声水平,传统的 IP 由于难以突破探测深度浅的瓶颈,导致在矿产普查和深层资源勘探中受到限制.从上世纪 70 年代开始,国内外很多学者发展了从 MT/CSAMT 资料中提取 IP 信息的研究,以提取深部矿体的 IP 信息^[24~31].

上世纪 80 年代以后,随着仪器设备的微型化、反演解释的二维化,人们对电磁法的结果更有信心,它已发展为一种成像工具,90 年代,这种成像工具被广泛应用于地表和航空勘探中^[32].

未来的发展趋势是电磁法将继续在金属矿勘查中担当重要的角色,可能在地下水、碳水化合物及地热勘探中发挥更大的作用,在地震静校正^[33]、海洋资源勘探^[34]和地震联合解释中电磁法都有待发挥作用.

2 电磁法数据处理及解释研究进展

在 20 世纪 90 年代,电磁数据处理和解释取得了很大的进步,处理方式逐渐多样化,反演从一维到三维,反演方法多种多样,很多组织和个人都对这方面做了大量的研究,其中比较著名的有 Utah 大学和 British Columbia 大学,澳大利亚联邦科学与工业组织(CSIRO)也在这方面做过工作^[32].

相对其他方法,对 MT 数据的处理比较活跃,由于 Robust 估计和张量分解算法的运用,提高了 MT 勘探在噪声环境下采集数据的能力,现在 Robust 估计是 MT 数据处理中必不可少的手段之一^[35,36]. MT 反演方面,3D 反演已取得了很大的进展,其中主要有共轭梯度极大似然反演^[37]、非线性共轭梯度反演^[38]、拟线性近似反演^[39]、快速松弛反演^[40]、贝叶斯统计反演^[41]和人工神经网络^[42]等.目前国外 3D 电磁勘探已常规化,MT 数据的 3D 反演已开始用于生产实践,已开发了许多三维反演软件^[37~40],并且已经应用到了矿产和地热勘探中^[43,44].国内 3D 电磁勘探还处推广阶段,谭捍东、余钦范^[40]等研究了 MT 数据的 3D 快速松弛反演;林昌洪、谭捍东^[45]等研究了 MT 数据的 3D 共轭梯度反演;胡祖志、胡祥云^[46]研究了 3D MT 数据的 2D 反演解释;杨迪坤、胡祥云^[47]对羌塘地块的 MT 资料作了 3D 反演解释.

在 MT 正反演取得发展的同时,CSEM 数据正反演技术也取得了长足的进步,国外 Eso 和 Oldenburg^[10]研究了矿产勘探中的 CSEM 数据 3D 反演及 3D 模拟.国内底青云、Martyn 等^[48]较好地研究了二维模

型二维源问题的数值模拟;王若、王妙月等^[49]研究了二维模型三维源问题的正演模拟;龚强、胡祥云^[50]研究了 CSAMT 2D 有限元数值模拟方法;何梅兴、胡祥云^[51]研究了 CSAMT 数据的 OCCAM 反演.

在 TEM 数据处理方面,主要还是为了提高信噪比,以便从数据中提取更加丰富的信息,目前一些新的 TEM 系统发展了新的信号处理技术,如借助地震勘探和电法勘探里面场的概念改进采集的数据,从而提高了解释结果的可靠性^[32].虽然时间域电磁法正反演技术不如频率域电磁法成熟,但也有许多研究报道,岳建华、杨海燕等^[52]研究了矿井瞬变电磁法三维时域有限差分数值模拟;熊彬、罗延钟^[53]研究了电导率分块均匀的瞬变电磁 2.5 维有限元数值模拟;翁爱华^[54]研究了 Occam 反演及其在瞬变电磁测深中的应用;熊彬、罗延钟等^[55]研究了瞬变电磁 2.5 维反演中灵敏度矩阵计算方法.

近年来,国内外很多学者对 MT/CSAMT 资料中提取 IP 效应进行了研究,大大提高了 IP 法的探测深度,对 IP 数据的二三维反演研究也得到了很多国内外学者的重视,Li 和 Oldenburg 等^[56,57]研究了 IP 数据的 3D 反演;Pelton 和 Rijo 等^[58]研究了 IP 数据及 2D 电阻率的反演;吴小平^[59]研究了基于共轭梯度法的 IP 数据三维快速反演;Gasparikova 和 Morrison^[60]研究了天然场中激发极化成像.

总的来说,电磁数据处理的重大进展在于微型计算机上的 3D 反演的实现,这大大提高了对复杂地区的数据解释的准确性,尤其在覆盖层下的碳氢化合物和复杂矿化带地区,近年来 3D 反演技术联合 2D 反演已被应用于几个重大的工程中^[32].

3 电磁法仪器设备研制进展

目前,国际上深部电磁勘探仪器设备向两个方向发展,一个是向多功能方向仪发展,另一个是向单一方向更高层次发展.多功能电磁法仪主要有:加拿大凤凰地球物理公司生产的 V5-2000、V8 多功能电法仪,美国 Zonge 公司生产的 GDP-32 多功能电法仪;频率域电磁法仪主要有美国 Geometrics 公司和 EMI 公司联合研制出的 Stratagem 电磁成像系统,Metronix 公司最新推出的 GMS-07 频率域综合电磁法仪;时间域电磁法仪主要有:加拿大 Geonics 公司生产的 PROTEM 系列,加拿大 Lamontagne 地球物理公司研发的 UTEM 系统,Crone 公司的 PEM 系统以及澳大利亚的 SIROTEM 系统等.

近年来国际上推出了一些分布式多种参数采集电

磁仪器,如加拿大 Quantec Geoscience 有限公司研制的 Titan-24 以及 M. I. M. 勘探公司推出的 MIMDAS.

4 电磁法在几个典型矿集区的应用

4.1 MT 在加拿大萨德伯里(Sudbury)镍-铜矿区的应用

萨德伯里矿区是世界上著名的铜、镍矿区,位于加拿大地盾南部,萨德伯里市北缘.该矿区已知的大型矿床 10 余个,中、小型矿床 30 余个.在萨德伯里矿区深部相继发现了大量的矿床和矿点,例如维克多矿床主矿体位于 1520 m 与 1672 m 深度之间,目前最深的钻孔已经达到 3057 m,在 2500 m 的部位仍然见到大量浸染状镍硫化物.通过深部勘探,在老矿区深部及边部发现了一系列矿床,故使这个 1889 年发现的老矿区铜、镍储量增加到 1 亿多吨,并已成为目前世界上最大的铜、镍矿产区.萨德伯里矿区最深的勘探深度现已达 2430 m,开采深度已经超过 2000 m,是一个典型的第二深度空间赋存的深部金属矿集区^[61].

作为深部地球物理勘探之一,Falconbridge 勘探公司在萨德伯里矿区做了 MT 深部找矿研究,使用仪器为 V5 MT 系统,数据反演采用二维 RRI 反演方法,通过 MT 探测探明了该矿床 1 km 以下的深部结构,由反演结果得到了两处具有明显的低阻异常带,经过钻孔验证为镍-铜矿体的反映,而且其空间分布及深度与钻井资料吻合.一处矿化度较弱,埋深在 1 km 左右,延伸至 2.5 km 左右,另一处矿化度较强,埋深在 2 km 左右,延伸至 3.5 km 左右^[5].通过 MT 在该地区的应用,探明了深部矿化带的位置及规模,为该地区进一步的开采指明了方向,大大降低了勘探风险.

4.2 综合电磁方法在加拿大 Shea 河铀矿区的应用

Shea 河矿区位于阿萨巴斯卡盆地西部,距离 Cluff 湖矿南部约 15 km.1969 年到 1985 年期间,许多公司在该矿区开展了铀矿勘探工作,大部分工作是由 Marline 石油公司于 1978 年至 1981 年期间完成的.早期的工程主要是区域性的,其中包括航空磁测、大地电磁测量、冰碛植被、湖泊和溪流的地球化学调查以及地质填图^[6].

1990 年,加拿大 AREVA 能源公司(原 COGEMA 资源公司)利用现代的探测深度大的航空地球物理勘测技术重新进行了 Shea 河工程.随后又进行了地面磁测、重力以及移动线框阵列电磁测量,圈定了一个北-北西向延伸的长条状石墨导体,被称为

Saskatoon 湖导体(SLC).1990 年代中期,更进一步的物探工作勘探出该导体的长度超过了 25 公里^[6].

2004 年,COGEMA 资源公司与 UEX 公司通过合作展开了积极的探测战略,在大片西部阿萨巴斯卡盆地区域,完成了航空电磁和重力梯度仪测量.自 2004 年以来,又在 Shea 河矿床区完成了一些地面电磁测量,包括三维直流电阻率、瞬变音频大地电磁(TAMT)、Titan-24、UTEM 双重回线电磁测量.通过综合电磁探测在 500 m 深位置发现了明显的低阻异常,经钻孔验证为含砂岩型铀矿地质单元.结果表明这次综合电磁测量在 Shea 河铀矿勘探中取得了较好的效果,尤其 Titan-24 测量的结果更好,勘探深度大,横向分辨率更高.

4.3 可控源电磁法(CSEM)在墨西哥圣尼古拉(San Nicolás)硫化物矿床中的应用

圣尼古拉矿床为块状铜-锌硫化物矿床,位于墨西哥中部的萨卡特卡斯州.主要的硫化物矿床由一连串形态复杂硫化物块体组成,被 175~250 m 厚由不同成分组成的覆盖层覆盖.地质情况较复杂,包含了大量的沉积物和火山岩.与该区域大多数地质体相比,硫化矿床为良导地质体,然而,覆盖层中一些第三系的火山角砾岩也具有良导特征.采用电法勘探寻找厚重导电覆盖层下的块状硫化物矿床具有一定挑战性.

在该场地进行过各种地球物理和地质勘探:重力、航空电磁、地面时域电磁、地面频域电磁和钻探.其中之一为采用标量 CSAMT 法对圣尼古拉大型硫化物矿床进行了测量,Eso 和 Oldenburg 采用 3D 频率域反演方法对该区域 CSAMT 数据进行了反演研究^[10].CSAMT 数据 3D 反演结果与钻井得到的硫化矿体轮廓非常一致,反演模型同时还得到了矿体和覆盖层之间的低阻盖层和高阻火山岩.与 1D 反演模型相比,3D 反演模型更清晰,主矿体硫化物的导电性更好.除了 CSAMT 测量外,在圣尼古拉地区还进行了时域 UTEM 测量,用类似的 3D 反演方法得到了相似的结果.

4.4 CSAMT 法和 TEM 法在铜陵龙虎山地区隐伏矿勘探中的应用

铜陵矿集区龙虎山地区位于扬子板块北缘,在秦岭—大别造山带前陆褶皱带中的下扬子拗陷带中部铜陵凸起中.为了回答该研究区内隐伏矿成矿物质运移途径和矿(化)体就位等地质问题,在铜陵矿集区的龙虎山地区开展了野外 CSAMT 和 TEM 测量,其中 CSAMT 测量使用仪器为 V8 多功能电法

仪,采用赤道装置进行标量测量,AB 发射极距为 2 km,MN 接收极距为 50 m,收发距大于 8 km. TEM 测量采用大固定发射回线和移动接收框,发射线框采用 $300\text{ m}\times 1\,200\text{ m}$ 的矩形线框,接收线圈为磁探头,等效面积为 100.0 m^2 ,发射电流为 10A. 对采集 CSAMT 和 TEM 数据分别进行一维 Bostick 反演和烟圈反演处理,从处理结果推断出:

(1)在 1500~2250 m 存在岩浆侵入通道.

(2)在 1500~2200 m 处的低阻带内存在着两个低阻极点,可能为岩体与海西期沉积硫化物矿床的接触部位,受侵入岩体及其热液流体的叠加改造,形成了低阻矿(化)点.

(3)在 2200~2300 m 处是矿化的高阻矽卡岩的有利部位.其余的高阻区反映了本区沉积的灰岩地层.这些推断均得到了钻孔(Zk1)资料的验证^[13].表明 CSAMT 法和 TEM 法是该区域寻找深部隐伏矿体的有效勘探手段.

4.5 CSAMT 法在辽西康杖子区深部探矿中的应用

朝阳新华铝业有限责任公司肖家营子铜钼矿床是辽西地区一个大型矽卡岩型金属矿床,大部分矿体是隐伏矿体,矿区外围的康杖子区与本区有相似的成矿地质环境,成矿地质条件优越.该矿床经过 20 多年的开采,保有资源储量逐年减少,为了稳定矿山队伍和实现企业可持续发展,新华铝业在该矿区外围的康杖子区进行了 CSAMT 法勘探工作,使用仪器为美国 Zonge 公司生产的 GDP-32,共在该区域布置 4 条测线,线距 100 m,点距 20 m,AB 发射极距为 1.5 km,发射机功率 30 kw,人工调节电流的大小,工作频率从 1 Hz~8192 Hz,数据处理使用美国 Zonge 公司生产的 scs2d 处理软件.通过 CSAMT 大功率大深度探测,在该区域 500~800 m 深发现了低阻带,经钻孔验证为钼、铁矿体,其中钼矿厚度 30 余米,铁矿体累加厚度 $163\text{ m}^{[15]}$.结果表明 CSAMT 法在该区域取得了理想的探矿效果,在矿区外围取得了第二深度空间找矿的重大突破.

4.6 EH-4 在东天山卡拉塔格(红山)铜金矿化带梅岭矿区中的应用

卡拉塔格(红山)铜金矿化带位于土屋—延东斑岩成矿带北 60 余公里处,北京矿产地质研究院在红山铜金矿区取得勘查进展,并在其东侧新发现梅岭铜金矿区.对梅岭矿区浅表金矿化和深部铜矿化的综合研究表明,本区矿化具有浅部为浅成低温热液型金矿化、深部为斑岩型铜矿化的特点,具有形成中大型斑岩—浅成低温热液型铜金矿的有利条件.为

了验证该认识,沈萍等人在垂直构造方向布置两条 EH-4 测线,测量选择 1、7 频段,信号弱的观测点叠加了 4 频段甚至几个频段多次叠加,电偶极距为 20 m.对测量结果进行二维反演,反演结果反映了地下存在 3 种截然不同的电性体:

(1)低阻($<100\ \Omega\cdot\text{m}$)体,规模较大且连续延深,呈面状分布于中高阻体两侧,宽 50~100 m,延深达地下 700 m.

(2)中阻($100\sim 300\ \Omega\cdot\text{m}$)体,广泛分布,构成本区电性体的主体.

(3)中高阻($500\sim 5179\ \Omega\cdot\text{m}$)体,呈一筒状产于低阻($<100\ \Omega\cdot\text{m}$)体之中.

结合地质资料和地表矿化情况,推测低阻异常为矿化异常.2004 年经钻孔验证为细脉—浸染状铜矿体($w\text{ Cu }0.7\%\sim 0.9\%$).此外,该区域内的 EH-4 测量结果在剖面 300~500 m 处深部发现的 2 个板状低阻体延伸可达 700 m,可以认为是矿致异常,具有重要的验证价值^[16].

5 展 望

随着浅部矿产资源的日益减少,深部尚未发现的矿产资源将是 21 世纪满足人类日益增长的矿产需求的主要来源之一,因而深部找矿已成为全球矿产勘查的一个主要方向.我国对深部找矿也非常重视,于 2009 年在武汉召开了物化探新技术方法深部找矿研讨会.日前,由中国地质调查局南京地质调查中心主办的“长江中下游地区深部找矿研讨会”在合肥举行.

电磁法作为地球物理勘探的一种重要方法,它现在已被广泛应用于地下结构成像,通常也作为磁异常成像的辅助工具,因为它能提供更佳分辨率的深度信息.电磁法已在深部矿产勘探中发挥重要的作用,未来会向地下水、碳氢化合物和地热等勘探中扩展,随着对资源消耗的增长,电磁法在深部找矿中将有广阔的发展前景.

(1)方法种类多,有频率域电磁法、时间域电磁法和激电法等,各种方法具有各自的优点,能适应不同环境的作业,能对不同埋深不同类型的矿体进行超前探测.

(2)数据处理技术日趋成熟,尤其是微型计算机上电磁法三维反演技术的实现,这使得解释者和研究员能更好地理解 and 解释电磁数据,解释者能提供更好更准确的解释结果,这让人们对电磁法在深部找矿中的应用结果更有信心.

(3)仪器种类多,新的仪器设备不断出现,诸如 Titan-24 分布式多种参数采集电磁系统,由于能有效去除天然和工业噪声的干扰,能适合矿区环境下采集,且对深部矿体的深度反映可靠,未来会在深部找矿中得到更多的应用。

(4)应用空间广,除了地面电磁法外,还有井中电磁法、航空电磁法、海洋电磁法,近年来井中电磁法和航空电磁法在深部找矿中都有一定的成效^[62~63],这进一步拓展了电磁法的找矿空间。

但是,在深部找矿中,没有哪一种方法是万能的,因为控矿介质与结构和深层过程是千差万别的^[64]。为此,必须针对不同探测目标,把电磁法技术与其它方法结合使用,如重力、磁法、地震等,发展新的联合分析方法,实现电磁法技术更高层次的应用。

参 考 文 献 (References):

[1] 刘宝珺. 资源环境的科学发展观[OL]. http://www.casad.cas.cn/yslt/200509/t20050921_43753.html, 2005.
Liu B J. Scientific concept of development of resources and environment[OL]. http://www.casad.cas.cn/yslt/200509/t20050921_43753.html, 2005.

[2] 周平, 施俊法. 瞬变电磁法(TEM)新进展及其在寻找深部隐伏矿中的应用[J]. 地质与勘探, 2007, 43(6): 63~69.
Zhou P, Shi J F. The new progresses in transient electromagnetic method (TEM) and their application to deep-concealed ore deposits[J]. Geology and Exploration, 2007, 43 (6): 63~69.

[3] 赵国泽, 陈小斌, 汤吉. 中国地球电磁法新进展和发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1171~1180.
Zhao G Z, Chen X B, Tang J. Advanced geo-electromagnetic methods in China[J]. Progress in Geophys (in Chinese), 2007, 22(4): 1171~1180.

[4] King A. Deep drill hole electromagnetic surveys for nickel/copper sulphides at Sudbury, Canada [J]. Exploration Geophysics, 1996, 27: 105~118.

[5] Stevens K M, McNeice G. On The detection of Ni-Cu ore hosting structures in the Sudbury igneous complex using the magnetotelluric method[J]. SEG Expanded Abstracts, 1998.

[6] Grant N, Rodney K. A progressive geophysical exploration strategy at the Shea Creek uranium deposit[J]. The Leading Edge, 2008, 52~63.

[7] Mark G. A comparison between conventional and distributed acquisition induced polarization surveys for gold exploration in Nevada[J]. The Leading Edge, 2007, 180~183.

[8] Andrews R K. The Sol sulfide system, Graham County, Arizona; Report on VIP work[J]. Kennecott Exploration, — 1975.

[9] Gasperikova E, Cuevas N H, Morrison H F. Natural field induced polarization for mapping of deep mineral deposits; A

field example from Arizona[J]. Geophysics, 2005, 70(6): 61~66.

[10] Eso R, Oldenburg D. 3D forward modeling and inversion of CSEM data at the San Nicolás massive sulphide deposit[J]. 4th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics, 2007, 185~188.

[11] Pospeeva E V. Application of Medium-Scale Magnetotelluric Sounding to Identify Deep Criteria for Promising Areas for Kimberlite Exploration [J]. Russian Journal of Pacific Geology, 2008, 2(3):205~217.

[12] Heinson G S, Direen N G, Gill R M. Magnetotelluric evidence for a deep-crustal mineralizing system beneath the Olympic Dam iron oxide copper-gold deposit, southern Australia[J]. Geological Society of America, 2006, 34(7): 573~576.

[13] 王大勇, 李桐林, 高远, 等. CSAMT 法和 TEM 法在铜陵龙虎山地区隐伏矿勘探中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6): 1134~1140.
Wang D Y, Li T L, Gao Y, *et al.* The Application of CSAMT and TEM to Exploration Buried Deposits in Longhu Mountain Area at Tongling, Anhui Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(6): 1134~1140.

[14] 高才坤, 汤井田, 王烨, 等. 基于 RRI 反演的高频大地电磁测深在深边部矿产勘探中的试验研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1):309~314.
Gao C K, Tang J T, Wang Y, *et al.* The test research of high frequency MT based on RRI inversion in exploring deep and limbic minerals[J]. Progress in Geophys (in Chinese), 2009, 24 (1): 309~314.

[15] 于泽新, 敖颖锋, 吕景增, 等. CSAMT 法在辽西康杖子区深部探矿中的应用[J]. 地质与勘探, 2009, 45(9):600~605.
Yu Z X, Ao Y F, Lv J Z, *et al.* The application of CSAMT in prospecting in dept in Kangzhangzi deposit in Western Liaoning province[J]. Geology and Exploration, 2009, 45 (5): 600~605.

[16] 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 等. EH4 连续电导率成像仪在隐伏矿体定位预测中的应用研究[J]. 矿床地质, 2007, 26(1): 70~78.
Shen P, Shen Y C, Liu T B, *et al.* Application of stratagem EH4 system to prediction of hidden ore bodies[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(1): 70~78.

[17] 沈远超, 申萍, 刘铁兵, 等. EH4 在危机矿山隐伏金矿体定位预测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 559~567.
Shen Y C, Shen P, Liu T B, *et al.* Prediction of hidden gold orebodies in depleted mines by the stratagem EH4 system [J]. Progress in Geophys (in Chinese), 2008, 23(1):559~567.

[18] 刘红涛, 杨秀瑛, 于昌明, 等. 用 VLF/EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿—以赤峰柴胡栏子金矿床为例[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2):276~285.

- Liu H T, Yang X Y, Yu C M, *et al.* A case study in finding concealed ores by using geophysical exploration methods in combination of VLF-EM, EH4 and CSAMT[J]. *Progress in Geophys (in Chinese)*, 2004, 19(2):276~285.
- [19] 陈乐寿,王光镠. 大地电磁测深法[M]. 北京:地质出版社, 1990.
- Chen Y S, Wang G E. The magnetotelluric method[M]. Beijing: Geology Publish House, 1990.
- [20] 杨长福,徐世浙. 国外大地电磁研究现状[J]. 物探与化探, 2005, 29(3): 243~247.
- Yang C H, Xu S Z. The present situation of magnetotelluric researches abroad [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2005, 29(3): 243~247.
- [21] 刘国栋. 矿产资源调查的物探方法和仪器设备[J]. 物探与化探, 2007, 31(3):278~287.
- Liu G D. Geophysical methods and instruments for mineral resource survey [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2007, 31(3): 278~287.
- [22] 戴自希,王家枢. 矿产勘查百年[M]. 北京:地震出版社, 2004.
- Dai Z X, Wang J S. Hundred years of mineral exploration [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2004.
- [23] 曹新志,张旺生,孙华山. 我国深部找矿研究进展综述[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2):104~109.
- Cao X Z, Zhang W S, Sun H S. Progress in the Study of Deep Exploration in China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(2):104~109.
- [24] Erika G, Frank M. Mapping of induced polarization using natural fields[J]. *Geophysics*, 2001, 66(1):137~147.
- [25] Marali S. Comparison of anomalous effects determined using telluric fields and time domain IP technique(test results)[J]. *Geophysics*, 1982, 2(1/2):44~45.
- [26] Morrison H F, Gasperikova E. Mapping of induced polarization using natural fields[J]. 66th Annual Internat SEG Mtg, Expanded Abstracts, 1996, 603~606.
- [27] Yue A P, Wang M Y, Shi K F. Preliminary study on IP information in signal of extremely low-frequency electromagnetic sounding with artificial high-power fixed source [J]. 19th Workshop of electromagnetic induction in the Earth, Expanded Abstracts, 2008, 794~799.
- [28] 吴汉荣,王式铭. 利用天然电磁场进行激发极化法测量的可能性[J]. 物探与化探, 1978, (1):62~64.
- Wu H R, Wang S M. The feasibility of nature source induced polarization [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1978, (1):62~64.
- [29] 陈清礼.天然场源激电法基础理论研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2001.
- Chen Q L. Fundamental study on induced polarization under nature electromagnetic source[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2001.
- [30] 罗延钟,张胜业,熊彬. 天然场激电法的可行性[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1):125~130.
- Luo Y Z, Zhang S Y, Xiong B. The feasibility of nature source induced polarization [J]. *Chinese J. Geophys (in Chinese)*, 2003, 46(1):125~130.
- [31] 岳安平,底青云,石昆法. 从 CSAMT 信号中提取 IP 信息探讨[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6):1925~1930.
- Yue A P, Di Q Y, Shi K F. The discussion on the IP information extraction from CSAMT signal[J]. *Progress in Geophys (in Chinese)*, 2007, 22(6):1925~1930.
- [32] Sherad S N, Ritchie T J, Chridtopheron K R. Mining, Environmental, Petroleum, and Engineering Industry Applications of Electromagnetic Techniques in Geophysics[J]. *Surveys in Geophysics*, 2005, 26:653~669.
- [33] Boerden E, Eikelboom J, Drievan P, *et al.* Resistivity imaging of shallow salt with magnetotellurics as a new aid to prestack depth migration[J]. *First Break*, 1992, 18(1):19~26.
- [34] Hoversten G M, Constable S C, Morrison H F. Marine magnetotellurics for base-of-salt mapping: Gulf of Mexico field test at the Gemini structure[J]. *Geophysics*, 2000, 65: 1476~1488.
- [35] Larsen J C, Mackie R L, Manzella A, *et al.* Robust Smooth Magnetotelluric Transfer Functions[J]. *Geophys. J. Int.*, 1996, 124:801~819.
- [36] Zerilli A, Botta M, Apolloni B. Improving Magnetotelluric Data Degraded Correlated Noise with Robust Regression Analysis and Recurrent Neural Networks [J]. 67th Ann. Internat. Mtg. Soc. of Expl. Geophys., 1997, 366~369.
- [37] Mackie R L, Madden T R. Three-dimensional magnetotelluric inversion using conjugate gradients[J]. *Geophys J. Int.*, 1993, 115: 215~229.
- [38] Newman G A, Alumbaugh D L. Three-dimensional magnetotelluric inversion using nonlinear conjugate gradients [J]. *Geophys J. Int.*, 2000, 140: 410~424.
- [39] Zhdanov M S, Fang S, Hursan G. Electromagnetic inversion using quasilinear approximation [J]. *Geophysics*, 2000, 65 (5): 1501~1513.
- [40] 谭捍东,余钦范,Booker J,等. 大地电磁三维快速松弛反演[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 850~855.
- Tan H D, Yu Q F, Booker J, *et al.* Three dimensional rapid relaxation inversion for the magnetotelluric method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(6): 850~855.
- [41] Spichak V, Menville M, Roussignol M. Three-dimensional inversion of the magnetotelluric fields using Bayesian statistics[J]. In Proc. Schlumberger Doll Research Symp. on 3D Electromagnetics, eds Spies B and Oristaglio M, USA, 1995, 347~358.
- [42] Spichak V, Popova. Artificial neural network inversion of magnetotelluric data in terms of three-dimensional earth macroparameters[J]. *Geophys J. Int.*, 2000, 142: 15~26.
- [43] Farquharson C G, Oldenburg D W, Kowalczyk P. Three-dimensional inversion of magnetotelluric data from the Turquoise Ridge mine, Nevada [J]. SEG Expanded Abstracts,

- 2004, 23, 1195~1197.
- [44] Uchida T, Lee T J, Sasaki Y, *et al.* Three-dimensional inversion of magnetotelluric data at the Bajawa geothermal field, Eastern Indonesia [J]. SEG Expanded Abstracts, 2001, 20, 1497~1500.
- [45] Lin C H, Tan H D, Tong T. Three-dimensional conjugate gradient inversion of magnetotelluric sounding data [J]. Applied Geophysics, 2008, 5(4): 314~321.
- [46] 胡祖志, 胡祥云. 大地电磁拟三维反演研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005.
- Hu Z Z, Hu X Y. Pseudo-three-dimensional magnetotelluric inversion [D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2005.
- [47] 杨迪坤, 胡祥云. 羌塘地块地壳三维电性结构研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.
- Yang D K, Hu X Y. Three-dimensional Electric Structure of Crust in Qiangtang Terrane[D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2008.
- [48] 底青云, Martyn Unsworth, 王妙月. 复杂介质有限元法 2.5 维可控源音频大地电磁法数值模拟[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4):723~730.
- Di Q Y, Unsworth M, Wang M Y. 2.5D CSAMT modeling with the finite element method over 2D complex earth media [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2004, 47(4):723~730.
- [49] 王若, 王妙月, 卢元林. 三维三分量 CSAMT 法有限元正演模拟研究初探[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2):579~585.
- Wang R, Wang M Y, Lu Y L. Preliminary study on 3D3C CSAMT method modeling using finite element method[J]. Progress in Geophys (in Chinese), 2007, 22(2):579~585.
- [50] 龚强, 胡祥云. CSAMT 二维正演研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2007.
- Gong Q, Hu X Y. 2-D CSAMT Forward Research [D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2007.
- [51] 何梅兴, 胡祥云. 可控源音频大地电磁二维 OCCAM 反演研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
- He M X, Hu X Y. 2-D OCCAM inversion study for controlled source audio magnetotelluric method[D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2009.
- [52] 岳建华, 杨海燕, 胡博. 矿井瞬变电磁法三维时域有限差分数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6):1904~1909.
- Yue J H, Yang H Y, Hu B. 3D finite difference time domain numerical simulation for TEM in mine [J]. Progress in Geophys. (in Chinese), 2007, 22(6):1904~1909.
- [53] 熊彬, 罗延钟. 电导率分块均匀的瞬变电磁 2.5 维有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2):590~597.
- Xiong B, Luo Y Z. Finite element modeling of 2.5D TEM with block homogeneous conductivity [J]. Chinese J. Geophys(in Chinese), 2006, 49(2):590~597.
- [54] 翁爱华. Occam 反演及其在瞬变电磁测深中的应用[J]. 地质与勘探, 2007, 42(5):74~76.
- Weng A H. Occam's inversion and its application to transient electromagnetic method[J]. Geology and Prospection, 2007, 42(5):74~76.
- [55] 熊彬, 罗延钟, 强建科. 瞬变电磁 2.5 维反演中灵敏度矩阵计算方法(D)[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3):616~620.
- Xiong B, Luo Y Zh, Qiang J K. Methods for calculating sensitivities for 2.5D transient electromagnetic inversion (I) [J]. Progress in Geophys (in Chinese), 2004, 19(3):616~620.
- [56] Li Y, Oldenburg D W. 3D Inversion of induced polarization data[J]. Geophysics, 2000, 65(6):1931~1945.
- [57] Oldenburg D W, Li Y. Inversion of induced polarization data [J]. Geophysics, 1994, 59:1327~1341.
- [58] Pelton W H, Rijo L, Swift C M. Inversion of two-dimensional resistivity and induced polarization data [J]. Geophysics, 1978, 43(4):788~803.
- [59] 吴小平. 利用共轭梯度法的激发极化三维快速反演[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5):62~64.
- Wu X P. Rapid 3D inversion of induced polarization data using conjugate gradient method [J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(5):62~64.
- [60] Gasperikova E, Morrison H F. Mapping of induced polarization using natural fields[J]. Geophysics, 2001, 66: 137~147.
- [61] 严加永, 滕吉文, 吕庆田. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3):871~891.
- Yan J Y, Teng J W, Lü Q T. Geophysical exploration and application of deep metallic ore resources [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(3):871~891.
- [62] Anderson H F, Duncan A C, Lynch S M. Geological Mapping Capabilities of the QUESTEM Airborne Electromagnetic System for Mineral Exploration-Mt. Isa Inlier, Queensland[J]. Explorat. Geophys., 1993, 24:333~340.
- [63] Eadie T. The Downhole EM Response of the Hellyer Ore Deposit[J]. Explorat. Geophys., 1987, 18:255~264.
- [64] 滕吉文, 杨立强, 姚敬金, 等. 金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2):317~334.
- Teng J W, Yang L Q, Yao J J, *et al.* Deep discover ore, exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2):317~334.